

絶対湿度の変化を利用した換気量推定方法の提案

小野 幹 治

概 要

現在ISOで決められている既往の換気量測定方法は、主に3種類(濃度減衰法、一定ガス供給法、定常濃度法)に分類できる。どれも特定のトレーサガスを室内に散布し、その濃度の変化や供給量から換気量を推定する手法である。ここで利用されるトレーサガスはどれも温暖化係数が高い物質であり、また、その濃度測定や自動散布には大がかりな装置が必要となる。

今回提案する手法は、新たにトレーサガスを散布することなく、屋外の水蒸気量の変化が室内の水蒸気量に及ぼす影響度から換気量を推定する。よって、市場に普及しているメモリ付き小型温湿度計を、建物内外に設置するだけで計測が可能になる。室内表面からの吸放湿が室内の水蒸気量に与える影響を考慮するため、室内には「仮想吸放湿体」を設定してモデル化を行った。

この報文は、簡易に行える換気量推定方法の、数学的根拠と、その使用方法を示したものである。

Method for Estimating Ventilation Rate Using Water Vapor Fluctuations

Abstract

Existing methods for measuring ventilation rates can be classified into three types (Concentration Decay Method, Continuous Dose Method, Constant Concentration Method). Each method requires supply the rooms to be measured with special tracer gases, and estimating the ventilation rate from changes in concentrations and supplying rate of the tracer gases. Each tracer gas has large Global Warming Potential (GWP), and the scale of the measuring and supplying apparatus are very large.

In the method proposed in this report, the ventilation rate can be estimated using outdoor water vapor fluctuations without the use of special tracer gases. The only apparatus necessary for the measurement is a pair of commercially-available thermohygrometers to be installed inside and outside the rooms. To allow for the moisture sorption/desorption properties of the surfaces of rooms, a "Virtual Sorption/Desorption Object" was included in the equation.

This paper describes the mathematical basis for the proposed method and the instructions for use.

キーワード: 換気量, 温湿度計, 推定方法,
水蒸気量, 吸放湿, トレーサガス

§1. はじめに

近年、当社の顧客の「地球環境」や「室内環境」に関する意識や専門知識は、国際環境情勢と同様に上昇している。これに伴い技術センターでは、建物の年間エネルギー消費量予測や結露対策といった技術依頼の件数が増加している。

この分野の検討は、まず建物の「熱収支シミュレーション」を作成することから始まる。「建物形状データ(図面)」、「材料毎の物性値」、「各室の換気量」、「その地域の標準的な年間気象データ¹⁾」をもとに「熱収支シミュレーション」は完成され、その建物の年間熱収支(室温、湿度、表面温度、空調負荷 etc.の時系列データ)が再現可能となる。さまざまな目的に応じた検討は、このデータをもとに行われている。

しかし、ここで問題になるのが、シミュレーションを作成する上で設定した「各室の換気量」である。特に自然換気に頼っている建物では実際の換気量とシミュレーションで設定した換気量に大きな開きが発生することがある。図1はガラス張りの階段室の自然室温計算結果を示したもののだが、換気量の設定によって最高室温は 10℃以上変わっている。このように換気量は、空調負荷や自然室温に大きな影響を及ぼすパラメータであり、設計値をそのまま入力してしまう既往のシステムには計算結果の利用範囲に限界があった。

そこで提案するのが、換気量の簡易推定方法である。シミュレーションを必要とする建物の各室の換気量を、簡単な実測によって事前に把握することを目的とする。この簡易推定方法を利用することにより、表面温度や絶対湿度の計算精度が必要とされる「夏型結露対策」等の検討が可能になる。本報告では、1ヶ月程度の温湿度計測のみを用いて換気量を推定する方法を紹介する。

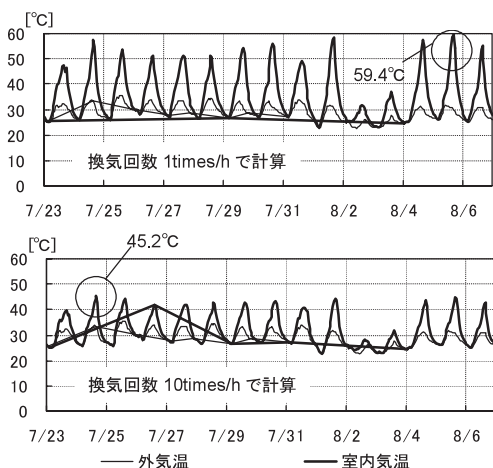


図1 自然室温のシミュレーション結果

§2. 既往の換気量測定方法と問題点

2.1 既往の換気量測定方法

室内の換気量測定方法は、①外気が流入しているところ(もしくは流出していくところ)の風速を計って流量を推定する方法と、②空気中にある既知濃度の特定物質(トレーサガス)の濃度変化を計測することで換気量を推定する方法の、2タイプに分類することができる。しかし、実際に計測を必要とする建物の多くは、流入もしくは流出箇所の特が難しいため、②のトレーサガスの濃度変化を利用した計測手法を利用することが多い。

ISO12569 (Thermal performance of building - determination of air change in buildings using various tracer gas techniques)では、3通りの試験方法(A.濃度減衰法, B.一定ガス供給法, C.定常濃度法)と、2通りのオプションが規定されている。²⁾

トレーサガスには、測定しやすいこと、導入する空気中の濃度が変動しないことが求められるので、人工合成物質の六フッ化硫黄(SF₆)や、入手の容易な二酸化炭素などが用いられる。濃度の変化は指数関数的であることが知られているので、算術的に換気量(換気回数)を求めることができる。以下に「A.濃度減衰法」における濃度変化の式の例を示す。

$$C_t = C_o e^{-Q/Vt}$$

t :時刻(h), C_t :時刻 t における室内のトレーサガス濃度(ppm), C_o :試験開始時における室内のトレーサガス濃度(ppm), Q :換気量(m³/h), V :空間の容積(m³)

2.2 既往のトレーサガス使用時の問題点

(1) 測定機器

前述した換気量測定法は、大型の計測機器、もしくは常駐の計測員を必要とする。「B.一定ガス供給法」や「C.定常濃度法」では、トレーサガスのオートフィーダーと濃度計測装置、そして攪拌のためのファン等が必要になる。「A.濃度減衰法」でも、最初に一定量のトレーサガスを噴霧した後、一定時間ごとに室内空気をサンプリングしなければならない。高価で大がかりなオートサンプラーが必要となる。

(2) トレーサガスの温暖化係数

現在 ISO で認められているトレーサガスは、どれも温暖化係数の高いガスである。なかでも、極めて温暖化係数が高いSF₆をトレーサガスとした測定がもっとも精度が高

いとされている。また、トレーサガスの必要散布量は空間のボリュームに比例するため、工場や物流施設などの大空間での測定には不向きである。

(3) 得られる知見

トレーサガス散布後は計測終了まで測定対象空間への出入りが一切禁止になるため、業務への影響を最小におさえるためにも測定は短時間で終わらせなければならない。よって、この測定方法で、「外部風速が換気量に及ぼす影響」や「室内外の温度差が換気量に及ぼす影響」や「執務者の活動が換気量に及ぼす影響」などといった長期データを必要とする知見を得ることは難しい。

§3. 変化する屋外絶対湿度の利用

3.1 本報で提案するトレーサガス

(1) トレーサガスとしての水蒸気

一般的に、室内表面材料からの「吸放湿の影響」や、「屋外の濃度の変動」を理由に、水蒸気をトレーサガスとして扱うことは困難とされている。しかし、これはおもに既往の測定方法にあてはめたときに起こる問題であり、発想を変えれば、「屋外の変動」をうまく利用して水蒸気量をトレーサガスとして扱うことができる。

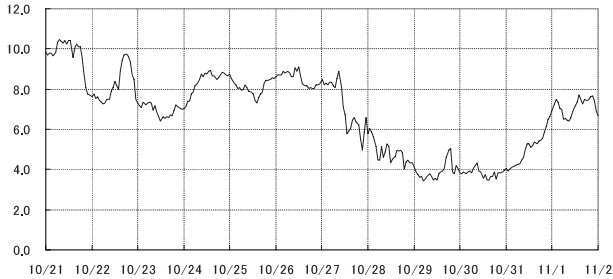


図2 屋外の水蒸気量の変化 [g/kg]

図2のように、外気中の水蒸気量は常に変化している。この「屋外の水蒸気量の変動」は、「室内の水蒸気量の変動」に影響を及ぼし、その「影響度」は、「換気量」と深い関係がある。

本提案は、「屋外の水蒸気量の変化」と「室内の水蒸気量の変化」を測定し、その「影響度」から「換気量」を推定する手法を提案する。

(2) 温湿度計の利用

既往の換気量測定法では、屋外空气中に存在しない、もしくは濃度が変化しない物質をトレーサガスとして扱っている。そのため、市場にはそれら物質の濃度を容易かつ安価に計測できる装置は存在しなかった。

一方、気温と相対湿度から算出できる「水蒸気量」は、広く普及しているメモリ付き小型温湿度計によって測定することが可能である。この種の計測器は、安価でかつデータ容量も増えているため、複数点での長期計測が可能となり、「外部風速」、「室内外温度差」、「執務者の活動」等が換気量に及ぼす影響を把握することができる。



図3 様々なメモリ付き小型温湿度計

3.2 外気の濃度変化を利用した換気量の推定方法

室内の濃度 x_i [g/kg] と、屋外の濃度 x_o [g/kg] は、時間 t [h] の微分方程式で表すことができる。

$$\frac{dx_i}{dt} = -N(x_i - x_o) \quad \cdots \textcircled{1}$$

N は換気回数[回/h]である。

ここで、 x_o は t の関数なので、計測間隔 τ [h] の範囲で、前後の計測値 $x_{o,0}$ と $x_{o,\tau}$ で屋外の水蒸気量の動きを再現することができる。

$0 \leq t \leq \tau$ の範囲において、

$(t, x_o) = (0, x_{o,0})$, $(t, x_o) = (\tau, x_{o,\tau})$ とすると、

$$x_o = \frac{x_{o,\tau} - x_{o,0}}{\tau} t + x_{o,0} \quad \cdots \textcircled{2}$$

この x_o を①式の微分方程式に組み込むと、

$$\frac{dx_i}{dt} = -N \left(x_i - \frac{x_{o,\tau} - x_{o,0}}{\tau} t - x_{o,0} \right) \quad \cdots \textcircled{3}$$

室内濃度の計測値 $x_{i,0}$ を初期条件として③の微分方程式を解くと、次式が得られる。

$$(t, x_i) = (0, x_{i,0})$$

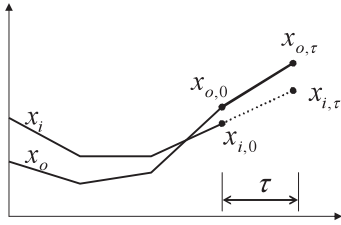
$$x_i = \left(x_{i,0} - x_{o,0} + \frac{x_{o,\tau} - x_{o,0}}{N\tau} \right) e^{-Nt}$$

$$+ \frac{x_{o,\tau} - x_{o,0}}{\tau} t + x_{o,0} - \frac{x_{o,\tau} - x_{o,0}}{N\tau} \dots \textcircled{4}$$

τ 時間後の室内濃度 x_i ($x_{i,\tau}$) は,

$$x_{i,\tau} = \left(x_{i,0} - x_{o,0} + \frac{x_{o,\tau} - x_{o,0}}{N\tau} \right) e^{-N\tau} + x_{o,\tau} - \frac{x_{o,\tau} - x_{o,0}}{N\tau} \dots \textcircled{5}$$

のように表すことができる。この式は、測定間隔前後の屋外濃度 $x_{o,0}$, $x_{o,\tau}$, 直前の室内濃度 $x_{i,0}$, そして換気回数 N [回/h] が既知であれば, τ 時間後の室内濃度 $x_{i,\tau}$ を算出できることを示している。



しかし、実際には全ての濃度 $x_{o,0}$, $x_{o,\tau}$, $x_{i,0}$, $x_{i,\tau}$ は計測によって得られていて、未知なのは換気回数 N である。そこで、⑤式を右边にまとめ、右边を $f(N)$ とし、 N について微分すると、

$$\frac{df(N)}{dN} = \left(x_{o,0}\tau - x_{i,0}\tau - \frac{(x_{o,\tau} - x_{o,0})(N\tau + 1)}{N\tau^2} \right) e^{-N\tau} + \frac{x_{o,\tau} - x_{o,0}}{N\tau^2} \dots \textcircled{6}$$

となる。 $f(N)$ は微分可能で、かつ上に凸の関数になり、 $f(N) = 0$ のときの換気回数 N は、ニュートンラプソン法等で簡単に算出することができる。

3.3 仮想吸放湿体を利用した換気量の推定方法

前節では、屋外の濃度変化を利用した換気量推定方法の考え方を提案したが、この方法をそのまま「水蒸気量の変化」で適用しようとすると不都合が生じる。

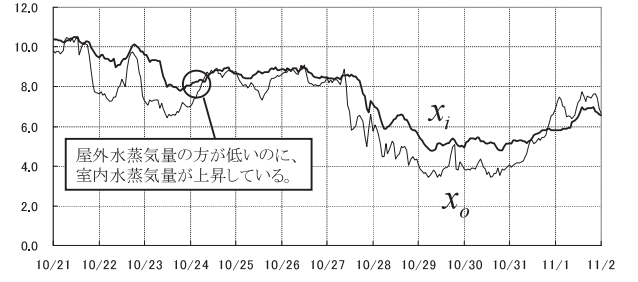


図 4 屋外水蒸気量と室内水蒸気量の変化 [g/kg]

上図は、実際の建物における内外の水蒸気量の変化を表したものであるが、屋外水蒸気量 x_o が、室内水蒸気量 x_i より低いにもかかわらず、 x_i が上昇していく箇所が見られる。室内水蒸気量 x_i の変化は換気回数 N だけで決まらず、仕上げ材料の表面でおきる吸放湿の影響を大きくうけるからである。

そこで、本節では室内に「仮想吸放湿体 W [g/kg]」を設定し、そこに室内の吸放湿分をすべて受け持たせるモデルを提案する。

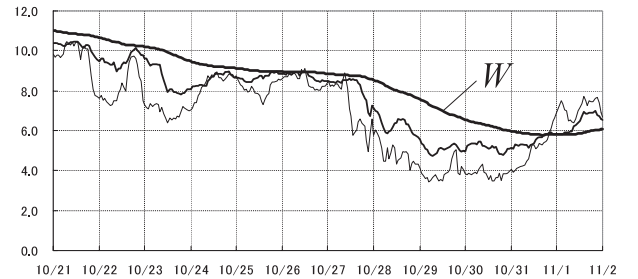
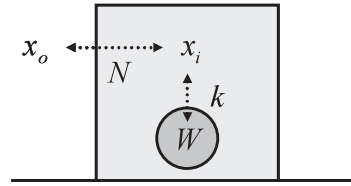


図 5 仮想吸放湿体 W [g/kg] の考え方

$$\frac{dW}{dt} = -k(W - x_i) \quad k \text{ は未知の定数} \dots \textcircled{7}$$

上図と⑦式に仮想吸放湿体 W の考え方を示す。材料表面からの吸放湿は、近傍空気の「相対湿度」の影響も受けるのだが、本報では簡略化のため、室内水蒸気量 x_i のみを外力とするモデル化をしている。ここで、 x_i は t の関数なので、 $0 \leq t \leq \tau$ の範囲において、

$$x_i = \frac{x_{i,\tau} - x_{i,0}}{\tau} t + x_{i,0} \dots \textcircled{8}$$

のような近似式を仮定し、⑦式に代入する。

$$\frac{dW}{dt} = -k \left(W - \frac{x_{i,\tau} - x_{i,0}}{\tau} t - x_{i,0} \right) \dots \textcircled{10}$$

初期条件 $(t, W) = (0, W_0)$ で微分方程式を解くと、

$$W = \left(W_0 - x_{i,0} + \frac{x_{i,\tau} - x_{i,0}}{k\tau} \right) e^{-kt} + \frac{x_{i,\tau} - x_{i,0}}{\tau} t + x_{i,0} - \frac{x_{i,\tau} - x_{i,0}}{k\tau} \dots \textcircled{11}$$

⑪式により、仮想吸放湿体 W [g/kg] の初期値 W_0 と、定数 k を設定すれば、室内の水蒸気量 x_i (計測値) を利用して、全時間の W を求めることができる。

ここで、 W と室内の水蒸気量 x_i と屋外の水蒸気量 x_o の間には守らなければならない大小関係がある。

$$x_o \leq x_i \leq W \quad \text{or} \quad x_o > x_i > W$$

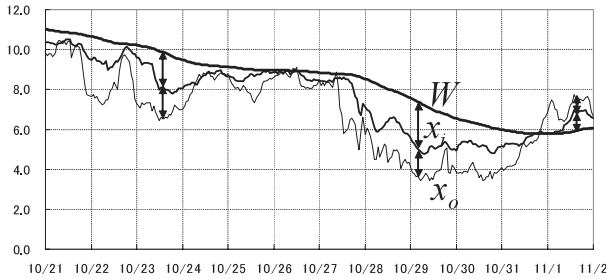


図6 W , x_i , x_o の上下関係

全時間のうち、上記の条件を満たしている時間の割合が多い W_0 と k の組合せは、⑪式を利用することで求めることができる。仮想吸放湿体 W [g/kg] の時系列データとは、その組合せのときの計算結果である。

求められた時系列の W から、計測間隔 τ [h] 毎の増減量 ΔW_τ を算出し、③式に組み込む。

$$\frac{dx_i}{dt} = -N \left(x_i - \frac{x_{o,\tau} - x_{o,0}}{\tau} t - x_{o,0} + \frac{\Delta W_\tau}{N\tau} \right) \dots \textcircled{12}$$

初期条件 $(t, x_i) = (0, x_{i,0})$ で微分方程式を解くと、

$$x_i = \left(x_{i,0} - x_{o,0} + \frac{x_{o,\tau} - x_{o,0}}{N\tau} \right) e^{-Nt} + \frac{x_{o,\tau} - x_{o,0}}{\tau} t + x_{o,0} - \frac{x_{o,\tau} - x_{o,0} + \Delta W_\tau}{N\tau} \dots \textcircled{13}$$

⑬式が得られ、 τ 時間後の x_i ($x_{i,\tau}$) は、

$$x_{i,\tau} = \left(x_{i,0} - x_{o,0} + \frac{x_{o,\tau} - x_{o,0}}{N\tau} \right) e^{-N\tau} + x_{o,\tau} - \frac{x_{o,\tau} - x_{o,0} + \Delta W_\tau}{N\tau} \dots \textcircled{14}$$

のように表すことができる。

この式により、建物内の執務者や、扉の開閉の影響が少なそうな時間帯の x_i を算出し、計測で得られた実際の室内の水蒸気量 $x_{i(\text{計測値})}$ との差が最小二乗となる N を求める。ここで求められた N が、その時間帯の換気回数 [回/h] の推定値となる。

3.4 屋外水蒸気量の変動幅と換気量推定精度

建物内の執務者から発生する水蒸気量や、扉の開閉などによる不確定要因を極力減らすため、換気量の推定は深夜時間帯の計測データを抽出しておこなう。

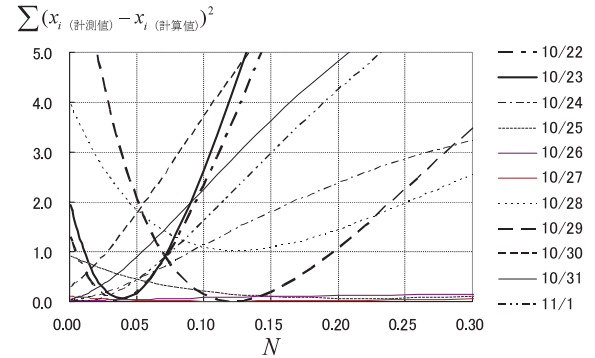


図7 各日の深夜時間帯における換気量推定精度

上図は、大型の物流倉庫での計測結果である。各日の深夜時間帯(執務者なし、ルーフファンは停止)の計測値と計算値の最小二乗 $\sum (x_{i(\text{計測値})} - x_{i(\text{計算値})})^2$ と N の関係が示されているが、それぞれの線の下端がすなわち換気回数 N [回/h] の解ということになる。

また各線は、下にきれいな凸になるほど、その時間帯の N の推定精度が高いことを示している。この精度の違いは主に屋外水蒸気量 x_o の変動量によるものである。

x_o の変動量大きい日 → N の推定精度が高い
 x_o の変動量小さい日 → N の推定精度が低い

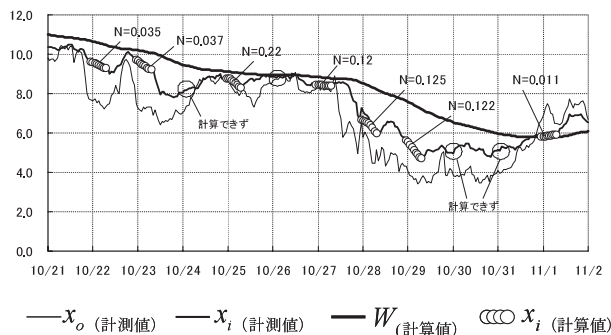


図 8 深夜時間帯の換気回数 N の推定結果

図 8 に、推定された換気回数 N によって計算された室内水蒸気量 x_i が示されているが、どれも概ね x_i (計測値) の値と重なっている。また、換気回数 N は外乱条件(屋外風速や内外温度差 etc.)に影響されるため、日ごとに異なった値となっている。(換気回数 N がどの時間帯も小さい値をとっているのは、空間が大規模であることと、ルーフファンが稼動していないためである。)

§5. まとめ

屋外の水蒸気量の変化を利用した、室内の換気回数推定方法を提案した。ISO等で規定されている既往の換気量測定法と比べ、大がかりな計測器が必要なくなり、特定のトレーサガスを噴霧する必要もないため、メモリ付き温湿度計による自動計測が可能となった。

屋外の水蒸気量の変化量が小さい期間は換気量は推定できない。そのため、建物内外の温湿度計測は1ヶ月程度行うことになるが、その間の「換気回数の変化」という有益な知見を得ることができる。

- (1)本提案では、SF6 などの温暖化係数の高いトレーサガスを噴霧せず、屋外の水蒸気量の変化を利用して換気量を推定する。
- (2)SF6 などのトレーサガスを利用しないため、オートサンプラーやフィーダーといった大がかりな機器を設置する必要がなく、屋外と室内に設置したメモリ付き小型温湿度計のみで計測が可能になる。
- (3)一般的なトレーサガスと違い、水蒸気量は換気だけでなく「吸放湿」の影響を受けるため、空間内に水蒸気量を外力とする「仮想吸放湿体」を設定したモデルを作成した。
- (4)空間内の執務者から発生する水蒸気量や、開口部の

開閉などによる不確定要因を減らすため、換気量の推定には深夜時間帯の計測データを利用する。

- (5)屋外水蒸気量の変動が大きい時間帯ほど換気量の推定精度は高くなるが、変動量が小さいと精度は下がり、換気量推定は不可能となる。
- (6)前述の理由により、建物内外の温湿度測定(水蒸気量測定)は1ヶ月程度行う。

本提案で使用する計測器は、市場に普及しているメモリ付き小型温湿度計であるが、これらの製品は保証精度が±1～3%程度であり、決して高精度とはいえない。よって換気量の推定結果にもある程度の誤差が必ず発生する。室内表面の吸放湿の影響を水蒸気量のみの関数で表現している点についても、推定精度に及ぼす影響度を把握する必要がある。

今後は様々なトレーサガスを利用した換気量測定方法との精度の比較実験を行う予定である。

参考文献

- 1) 日本建築学会編:拡張アメダス気象データ, 標準年データ, 丸善, 2000.
- 2) 建築・住宅国際機構:建築環境の熱的性能とエネルギー使用 (ISO/TC163) 国際規格シンポジウム資料, 2006.

ひとこと

換気量の概算が安価で簡易になったことで、小規模な結露対策などにも気軽に利用できるようになりました。



小野 幹治